

Anhang A

Lehrerhandreichung

A1) Epistemologische Unterrichtsfelder im Überblick

Unterrichtsfeld	Schwerpunkt
1. Konkreter Umgang (Vorschlag: 4 Stunden)	1.1 Vorstellung des Unterrichtskonzepts 1.2 Umgang mit optischen Komponenten des MZ-Interferometers 1.3 Teilchenmodell für das Licht 1.4 Wellenmodell für das Licht und Aufbau des MZ-Interferometers
2. Zielgerichtete Beobachtung (Vorschlag: 1 Stunde)	2.1 Justierung des MZ-Interferometers
3. Idealisierung (Vorschlag: 2 Stunden)	3.1 Modellierung des MZ-Interferometers 3.2 Wellenmodell des Lichts im MZ-Interferometer
4. Rationale Rekonstruktion (Vorschlag: 4 Stunden)	4.1 Photonhypothese 4.2 Das MZ-Interferometer für Photonen 4.3 Interpretationen der Quantentheorie 4.4 Experimente mit MZ-Interferometer für Photonen

A2) Lernziele und Gliederung mit Zeitangaben

1. Unterrichtsfeld: Konkreter Umgang

Allgemeine Intentionen: In dem ersten Unterrichtsfeld - *Konkreter Umgang* – sollen der Aufbau des Interferometers und die Betrachtung der Lichtbündel Themen des Unterrichts sein. Die Schüler sollen auf dieser Stufe einerseits mit realen Objekten – Lichtquellen, Spiegeln und halbdurchlässigen Spiegeln – und andererseits mit modellierten Objekten – z.B. Lichtstrahl und Wellenmodell – im Unterricht “experimentieren”. Sie sollen ihre Beobachtungen beschreiben und sich überlegen, wozu Modelle in der Physik dienen. Die in diesem Unterrichtsfeld durchgeführten Versuche dienen der experimentellen Untermauerung bei:

- der Wiederholung und der Festigung elementarer Begriffe der geometrischen Optik, wie Lichtstrahl, geradlinige Ausbreitung des Lichts, Reflexions- und Brechungsgesetz.
- der Gewinnung grundlegender Fähigkeiten auf dem Gebiet der experimentellen Optik.
- der Motivation zur Einführung in die Diskussion über Themen der folgenden Unterrichtsstunden.

1. Stunde: Vorstellung des Unterrichtskonzepts

Die Schüler sollen:

- erfahren, dass das physikalische Phänomen “Lichtausbreitung in einem Interferometer” im Verlauf der Unterrichtsreihe mit zunehmender Abstraktion betrachtet wird.
- kurz kommentieren, was sie unter Modellen in der Physik verstehen, und Beispiele dazu nennen.
- wissen, dass der Lichtstrahl ein Modell ist und dass das Licht selbst nicht aus Strahlen besteht.

2. Stunde: Umgang mit optischen Komponenten des Interferometers

Die Schüler sollen:

- Vertrautheit mit den optischen Komponenten des Mach-Zehnder-Interferometers (Laserquelle, Spiegel, Linsen und Strahlteiler) gewinnen.
- die geradlinige Ausbreitung des Lichts durch einfache Demonstrationen feststellen und das selbständig beschreiben.
- wissen, dass, wenn eine Lichtbündel an einem ebenen Spiegel reflektiert wird, einfallende und reflektierte Strahlen sowie das Einfallslot in einer Ebene liegen und dass der Reflexionswinkel immer gleich dem Einfallswinkel ist (Reflexionsgesetz)
- durch einfache Experimente mit einer Laserquelle und einer planparallelen Glasplatte erfahren, dass der Lichtstrahl beim Durchgang durch einen Strahlteiler zum Teil verschoben (Transmission) und zum Teil reflektiert (Reflexion) wird.

3. Stunde: Teilchenmodell

Die Schüler sollen:

- die allgemeinen Aussagen der Korpuskulartheorie des Lichts nach Newton kennen und mit Hilfe dieses Modells die geradlinige Ausbreitung des Lichts, die Reflexion des Lichts am ebenen Spiegel und die Reflexion bzw. die Transmission des Lichts am Strahlteiler selbständig beschreiben.
- den Bahnbegriff kennen.
- wissen, dass nach den Newtonschen Aussagen (Herleitung des Brechungsgesetzes aus den Bewegungsgesetzen der Mechanik) das Licht im optisch dichteren Mittel schneller und nach der Huygensschen Aussagen langsamer als im optisch dünneren Mittel sich fortpflanzt.

4. Stunde: Wellenmodell und Aufbau des Interferometers

Die Schüler sollen:

- den Begriff Interferenz kennen.
- mit Hilfe einfacher Demonstrationen erfahren, dass das Licht Interferenz verursachen kann.
- wissen, dass Interferenz mit Hilfe des Wellenbildes erklärt werden kann.

- wissen, dass Interferenz mit Hilfe des Teilchenbildes nicht erklärt werden kann.
- erkennen, dass es zwei Bilder (Wellen- bzw. Teilchenbild) für das Licht gibt. Sie sollen diese beiden Bilder bezüglich der Begriffe “Bahn” und “Interferenz” unterscheiden.
- in Gruppen das Mach-Zehnder-Interferometer aufbauen.

2. Unterrichtsfeld: Zielgerichtete Beobachtung

Allgemeine Intentionen: Der zweite Unterrichtsabschnitt – *Zielgerichtete Beobachtung* – erfasst die Justierung des Interferometers und das Heranziehen eines qualitativen Wellenmodells für das Licht. Die Schüler sollen das Interferometer so gut justieren, dass die erwünschten Interferenzmuster beobachtet werden können.

5. Stunde: Justierung des Interferometers

Die Schüler sollen:

- wissen, dass nach dem Wellenbild für das Licht komplementäre Interferenzmuster auf den beiden Schirmen des Interferometers beobachtet werden sollte.
- das Mach-Zehnder-Interferometer gut justieren, so dass die komplementären Interferenzmuster beobachtet werden können.
- erfahren, dass die Beobachtung der Interferenzerscheinung im Interferometer gelingt, wenn das Interferometer gut justiert ist. Aus den theoretischen Aussagen (Wellenmodell für das Licht) weiß man vom Anfang an, welches Phänomen (Interferenzerscheinung) zu beobachten ist, und gerade deswegen gelingt es, das Interferometer zu justieren.

3. Unterrichtsfeld: Idealisierung

Allgemeine Intentionen: Der Schwerpunkt des dritten Unterrichtsabschnitts – *Idealisierung* – liegt auf der Betrachtung eines schematisierten und idealisierten Interferometers und auf der Verwendung eines formalen Wellenmodells des Lichts. An dieser Stelle wird das reale Phänomen: Apparat, Licht, Interferenzmuster ein idealisiertes Phänomen. Die experimentellen Störungen, wie z.B. Fehler auf Spiegeln und Linsen oder Dispersion des Lichts, müssen außer acht gelassen werden. Die Schüler sollen wahrnehmen,

dass das idealisierte Interferometer bzw. das idealisierte Phänomen nicht auf die gleiche Art real wie das wirkliche Interferometer bzw. das beobachtete Phänomen ist.

6. Stunde: Modellisierung des Interferometers

Die Schüler sollen:

- wissen und selbständig beschreiben, was Periode, Frequenz, Amplitude und Phase einer Welle ist.
- wissen und selbständig beschreiben, was konstruktive und destruktive Interferenz ist.
- einige besonderen Eigenschaften des Laserlichts (Monochromie, Kohärenz und geringe Divergenz) kennen und beschreiben.
- eine Skizze des Mach-Zehnder-Interferometers zeichnen und die Unterschiede zwischen dem realen und dem idealisierten Interferometer nennen.
- mit Hilfe der Skizze des Interferometers die Interferenzerscheinung (konstruktive bzw. destruktive Interferenz) in beiden Schirmen des Interferometers erklären.
- sich überlegen und mit einigen Worten wiedergeben, wozu ein idealisiertes Interferometer nützlich sein kann.

7. Stunde: Wellenmodell des Lichts im MZ-Interferometer

Die Schüler sollen:

- die komplementären Interferenzmuster im Mach-Zehnder-Interferometer mit Hilfe des (quantitativen) Wellenmodells für das Licht erklären.

4. Unterrichtsfeld: Rationale Rekonstruktion

Allgemeine Intentionen: In dem vierten Unterrichtsabschnitt – *die Rationale Rekonstruktion* – wird das Interferometer bzw. das Phänomen zu einem völlig theoretischen Konstrukt. Das zu beobachtende Phänomen ist die Entstehung eines Interferenzmusters aus einzelnen Photonen, es wird jedoch nur durch Analogie zum bereits bekannten Phänomen Lichtinterferenz erschlossen.

8. Stunde: Photonhypothese

Die Schüler sollen:

- erfahren, dass das Licht Elektronen aus Metalloberflächen herauslösen kann.
- wissen, dass die Energie des Photons, die auf das Elektron übertragen wird, $E = h\nu$ ist.
- erfahren, dass das Licht einer bestimmten Farbe unterhalb der Grenzfrequenz auch mit extrem hoher Intensität keine Elektronen aus Metalloberflächen herauslösen kann.
- erfahren, dass mit steigender Lichtintensität die herausgelösten Elektronen nicht schneller werden.
- erkennen, dass mit Hilfe der Wellenvorstellung die Herauslösung von Elektronen oberhalb einer Grenzfrequenz nicht erklärt wird.
- wissen, warum der Photoeffekt der Wellenvorstellung widerspricht.
- wissen, dass es in der Physik zwei unvereinbare Bilder für das Licht gibt: das Wellen- und das Teilchenbild. Sie sollen wissen, dass Teilchen als lokalisierte Entitäten, die bestimmte Bahnen beschreiben, charakterisiert werden, und Wellen dagegen als ausgedehnte Entitäten, die bei Überlagerungen Interferenz verursachen können, gekennzeichnet werden.

9. Stunde: Das Interferometer für einzelne Photonen

Die Schüler sollen:

- wissen, wie einzelne Photonen erzeugt und registriert werden können
- ein Schema des Interferometers für Photonen auf ihrem Arbeitsblatt darstellen und beschreiben können, was an diesem schematisierten Interferometer verändert werden muß, um einzelne Photonen in diesem gedachten Interferometer untersuchen zu können.
- wissen, dass Interferenzmuster aus einzelnen Punkten entstehen, wenn einzelne Photonen nacheinander in das Interferometer geschickt werden.

10. Stunde: Interpretationen der Quantenphysik

Die Schüler sollen:

- wissen, dass auch nach der Erklärung der Funktion des Interferometers für einzelne Photonen das “Mysterium der Photonen” nicht verschwindet.
- wissen, dass es verschiedene Interpretationen für das Verhalten des Photons im Interferometer gibt.
- wissen und selbständig beschreiben, dass die Interferenzerscheinungen auf den Schirmen verschwinden, wenn man den Weg eines Photons im Interferometer mit Hilfe eines Detektors bestimmen kann.
- die Dialektik der gegenseitigen Bestimmung der Teilchenbild und Wellenbild mit Photonen in Verbindung bringen und die kritischen Aspekte verschiedener Interpretationen kennen.

11. Stunde: Experimente mit Interferometer für einzelne Photonen

Die Schüler sollen die folgenden Konsequenz der Quantenphysik kennen:

Jedes registrierte Photon überträgt seine ganze Energie auf eine einzige Stelle. Eine derartige lokalisierte Wechselwirkung ist typisch für das Teilchenbild.

Jedes Photon wird nicht mit gleicher Wahrscheinlichkeit in den Detektoren D1 und D2 im Interferometer registriert. Ein derartiges Verhalten ist nicht typisch für ein (klassisches) Teilchen.

Ein Hindernis oder ein Detektor im Weg des Photons im Interferometer verändert das Verhalten der Photonen, sodass die Detektoren D1 und D2 mit gleicher Wahrscheinlichkeit ein Photon registrieren können.

Das Verhalten von Photonen im Interferometer kann mit Hilfe des Wellenbildes beschrieben werden. Die Intensität des Lichts im Wellenbild (proportional zum Quadrat der elektrischen Feldstärke) ist jedoch proportional zur Wahrscheinlichkeit, Photonen an einem Ort zu registrieren.

Die ψ -Funktion beschreibt die Wahrscheinlichkeit, Photonen in einem bestimmten Raumvolumen nachzuweisen.

Die ψ -Funktion hat nicht den Status einer physikalischen Messgröße, sondern eher den einer mathematischen Hilfsgröße.

Das am Beispiel des Mach-Zehnder-Interferometers betrachtete Phänomen (d.h. wenn die Zahl von registrierten Photonen sehr groß wird, lässt sich aus einzelnen Photonen ein ähnliches Interferenzmuster wie beim kontinuierlichen Licht erkennen) ist nur ein Spezialfall. In der Quantenphysik trifft man immer wieder auf ähnliche Situationen, wenn man Interferenzexperimente mit Quantenobjekten (wie z.B. Elektronen) durchführt.

Es ist nicht möglich, das physikalische Verhalten von Photonen in einem reinen Teilchen- oder Wellenbild zu beschreiben. Eine befriedigende Erklärung muss Elemente beider Modelle in sich vereinigen.

A3) Unterrichtsmaterial

1. Unterrichtsfeld: Konkreter Umgang

1. Informationsblatt zum Themenbereich: Das Licht

(Der Text zu diesem Infoblatt orientiert an: "Kuhn Physik, Band I – Gesamtband, 1975" und an: "PSSC – Physical Science Study Committee, 1974")

Demonstrationsversuche: Wir bringen eine punktförmige Lichtquelle in ein zylindrisches Lampengehäuse und erzeugen damit einen "Lichtraum", der mit Rauchteilchen sichtbar gemacht werden kann. Er ist "geradlinig" begrenzt und kegelförmig. Wir sprechen von einem geraden Lichtkegel. Schließen wir die Lampe mit einer immer kleiner werdenden kreisförmigen Blende ab, so wird der Lichtkegel immer schmäler (s. Abb. A.1).

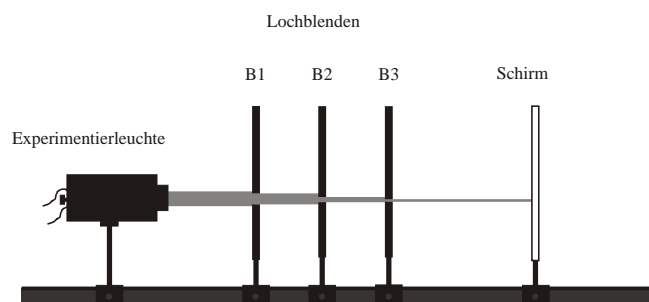


Abbildung A.1: *In Gedanken können wir jeden Lichtkegel bis auf die Achse des Kegels verengen. Dann erhielten wir einen geometrischen Strahl. Dieser wäre aber kein Lichtbündel mehr, weil die Blende so eng sein müsste, dass kein Licht sie mehr passieren könnte.*

Für einige Zwecke lässt sich das schmale Lichtbündel durch seine Idealisierung, den geometrischen Strahl, ersetzen. Wir ersetzen dabei die mit dem Auge wahrnehmbare "Lichtwirklichkeit" durch ein geometrisches Gedankengebilde und treiben geometrische Optik.

Wir nennen den geometrischen Strahl ein Modell des physikalischen Lichtbündels.

Häufig zieht man mit einigen Strahlen den Lichtweg nach, durch den beispielsweise in der Abb. A.2 der Schatten gebildet wird. Im Licht, das offenbar von der Oberfläche der Lichtquelle ausgeht und sich in alle Richtungen ausbreitet, sind diese gezeichneten Strahlen natürlich nicht zu erkennen. Sie sind aber in ähnlichem Sinne nützlich wie die Konstruktionslinien in der Zeichnung eines Architekten, doch sind sie ebensowenig Licht, wie die Linien des Architekten Wände oder Fenster sind. *Das Licht selbst besteht nicht aus Strahlen, sie sind unsere gedankliche Schöpfung.*

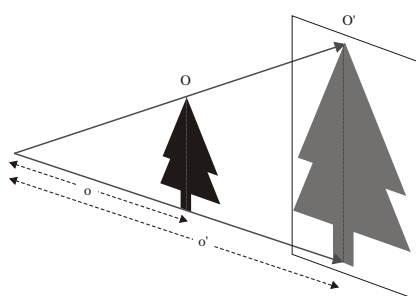


Abbildung A.2: Schattenbildung

Mit Hilfe der geometrischen Strahlen beschreiben wir den Weg des Lichts und mit Hilfe der geometrischen Optik lernen wir:

- Das Licht breitet sich in einem homogenen Stoff geradlinig aus.
- Das Reflexionsgesetz für den ebenen Spiegel: Einfallender und reflektierter Strahl liegen mit dem Einfallslot in einer Ebene. Einfallswinkel und Reflexionswinkel sind gleich groß. Bei senkrechtem Einfall wird der Lichtstrahl in sich selbst reflektiert.
- Durchgang des Lichts im Strahlteiler: Ein Lichtstrahl wird beim Durchgang durch eine planparallele Glasplatte (Strahlteiler) zum Teil verschoben (Transmission), aber nicht abgelenkt, und zum Teil reflektiert wie im Spiegel (Reflexion).

1. Unterrichtsfeld: Konkreter Umgang**2. Arbeitsblatt zum Themenbereich:****Umgang mit optischen Komponenten des MZ-Interferometer**

(Die Aufgaben zu diesem Arbeitsblatt wurden von D. Knebel und M. B. Fagundes entwickelt und der Text besteht aus Teilen und adaptierten Textteilen von "Kuhn-Physik, Band I-Gesamtband, 1975")

Lupen, Brillen, Fernrohre und Mikroskope sind optische Instrumente, die mehr oder weniger aus zufälligen Entdeckungen entstanden sind. Sie wurden zunächst rein handwerklich gebaut und aus den handwerklichen Erfahrungen heraus verbessert und weiter entwickelt, oft bevor die physikalischen Zusammenhänge der Reflexion, Brechung und Bildentstehung genau bekannt waren. Diese handwerkliche Technik hat die Physiker zu vielen Fragestellungen veranlasst.

Man darf dabei nicht übersehen, dass die Weiterentwicklung der für die Menschen immer lebenswichtiger werdenden optischen Geräte erst mit der mathematischen Erfassung der Abbildung und der Brechung auf eine neue, nämlich wissenschaftliche Grundlage gestellt wurde. Dies setzte die Vorstellung des Lichtstrahls voraus, mit der man längst bekannte Erscheinungen erklären, verstehen, konstruieren und schließlich berechnen konnte.

Die Idealisierung des "Lichtkegels" zum geometrischen Strahl schuf die Voraussetzung, mit diesen Strahlen Geometrie zu treiben, um die mathematischen Zusammenhänge der Optik aufzudecken.

Bei aller Bedeutung der optischen Geräte stellt für den Menschen das von der Lichtwirklichkeit abstrahierende Gedankengebilde Strahl die eigentliche geistige Leistung dar; sie erst ermöglichte die theoretische Bewältigung der bisher aufgetretenen optischen Probleme und wandelte die Methode des zufälligen Findens in ein planvolles Forschen ab.

Materialliste: 1 Handlaser, 1 Strahlteiler, 3 Irisblenden, 1 Oberflächenspiegel mit Rädelschrauben zur Neigungsverstellung, Maßband / Zollstock, Winkelmesser, 1 Sammellinse $f = 5$ mm.

1. Aufgabe: (Gruppenarbeit):

1.1) Stellen Sie gemeinsam drei Irisblenden und eine Sammellinse so in die Tonnenfüße, dass ein Laserbündel durch alle vier Elemente ungehindert hindurchtreten kann. Der Abstand von je zwei der fünf Elemente (Laser, Blenden, Linse) soll mindestens 60 cm betragen.

1.2) Im Regelfall ist hierdurch noch nicht garantiert, dass nun das Laserbündel parallel zur Tischplatte verläuft. Wie kann man sicherstellen, dass das Lichtbündel hier parallel zur Tischplatte verläuft? Justieren Sie den Laser mit Hilfe von zwei bis drei Blenden nun so, dass das Bündel so gut wie möglich parallel zur Tischplatte verläuft.

2. Aufgabe: (Gruppenarbeit):

2.1) Beleuchten Sie den Strahlteiler senkrecht mit einem Laserbündel. Was passiert mit dem Strahl? Wie groß ist hier der Einfallswinkel?

2.2) Beleuchten Sie den Strahlteiler schräg mit einem Laserbündel. Welcher Winkel entsteht zwischen den beiden ausfallenden Strahlen? Beschreiben Sie diesen Winkel mit Hilfe des Einfallswinkels.

2.3) Bringen Sie nun mit Hilfe eines Oberflächenspiegels die beiden ausfallenden Lichtbündel an der Wand hinter dem Strahlteiler in einem Fleck zur Deckung. Benutzen Sie dabei die 3 Rädelschrauben auf der Rückseite des Oberflächenspiegels.

2.4) Überlegen Sie sich nun gemeinsam eine Methode, den Strahlteiler genau so schräg zum Einfallsstrahl zu stellen, dass die ausfallenden Lichtbündel einen 90° Winkel zueinander bilden, sowie eine Möglichkeit, diesen Sachverhalt messtechnisch zu überprüfen. Wie groß ist in diesem Fall der Einfallswinkel?

3. Aufgabe:

3.1) Können Sie die geradlinige Lichtausbreitung, das Reflexions- und das Brechungsgesetz mit dem Teilchenmodell des Lichts erklären? Fassen Sie das zusammen.

3.2) Beschreiben Sie einen Strahlteiler mit den Begriffen: Transmission, Reflexion und Absorption.

3.3) Weshalb ist in Versuch 2.3 kein Interferenzbild zu sehen?

3.4) Was ist Licht? Fassen Sie die Positionen in ihrer Arbeitsgruppe auf einer OH-Folie zusammen.

1. Unterrichtsfeld: Konkreter Umgang**3. Arbeitsblatt zum Themenbereich: Ein Teilchenmodell für das Licht**

(Der Text zu diesem Infoblatt besteht aus Teilen und adaptierten Textteilen von “Kuhn-Physik, Band I-Gesamtband”, “PSSC – Physical Science Study Committee” und “Geschichte der Physik 2 – Kunze”)

Wir haben mit Licht experimentiert und sein Verhalten beim Zusammentreffen mit Hindernissen, Spiegeln und Strahlteilern beobachtet.

Die *Idealisierung* des *Lichtkegels* zum *Lichtstrahl* eröffnete uns im Rahmen einer geometrischen Optik die Möglichkeit, grundlegende Gesetzmäßigkeiten der Wege der Lichtbündel aufzudecken und mit Hilfe dieser Modellvorstellung Gesetzmäßigkeiten theoretisch zu formulieren.

Jetzt werden wir versuchen, ein Modell für das Licht zu entwickeln, das seine Eigenschaften, soweit wir es bisher mit Hilfe der optischen Komponenten untersucht haben, erklären kann. Dabei werden wir Vorstellungen folgen, die schon vor einigen Jahrhunderten entwickelt wurden. Der Begründer eines Teilchenmodells des Lichts, das hier untersucht werden soll, war kein geringerer als Sir Isaac Newton. Licht geht stets von leuchtenden Körpern aus und breitet sich im wesentlichen geradlinig aus. Jedes Modell vom Licht muss deshalb etwas enthalten, das von einem leuchtenden Körper ausgeht und sich entlang einer Geraden bewegt. Das einfachste Gebilde, das sich nach unserer Vorstellung in dieser Weise fortbewegen kann, ist ein Teilchen, etwa ein Ball. Wir können also annehmen, dass ein leuchtender Körper einen Strom von Teilchen aussendet. Zwar ließe sich dem entgegenhalten, dass sich Bälle und andere Teilchen im allgemeinen nicht geradlinig, sondern auf gebogenen Bahnen bewegen und schließlich zur Erde fallen. Wir wissen aber andererseits, dass die Krümmung der Bahn eines Balles mit zunehmender Geschwindigkeit geringer wird. Daher kann man annehmen, dass die Bahnen von Lichtteilchen, da sie sich mit einer Geschwindigkeit von $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ausbreiten, kaum von der Anziehungskraft der Erde beeinflusst werden. Mit dem klassischen Teilchenmodell des Lichts lässt sich also ohne Schwierigkeiten erklären, dass sich das Licht geradlinig ausbreitet.

Übung:

Ein hypothetisches Lichtteilchen wird horizontal mit der Anfangsgeschwindigkeit v_0 von einer Kerze ausgesendet. Welche Anfangsgeschwindigkeit v_0 muss das Lichtteilchen haben, das auf eine Wand in $S = 5 \text{ m}$ Entfernung trifft und dort einen Abstand $h = 0,5 \text{ mm}$ von dem Punkt hat, der sich bei exakt wagrechter Ausbreitung ergeben hätte (s. Abb. A.3).

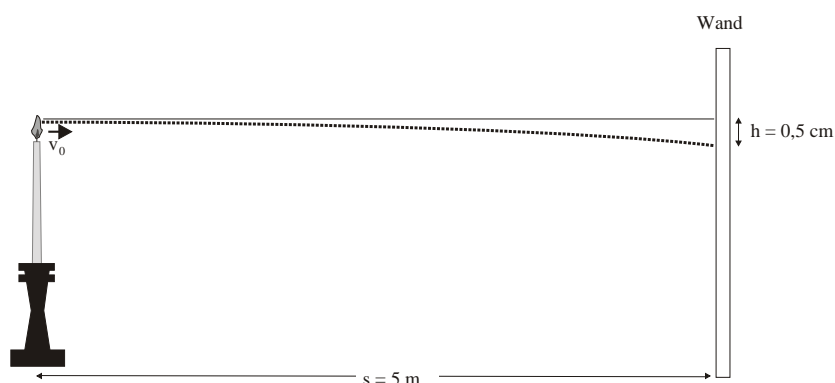


Abbildung A.3:

In horizontaler Richtung gelten die Gesetze der gleichförmigen Bewegung:

$$t = \frac{s}{v_0}.$$

In senkrechter Richtung gelten die Gesetze des freien Falls:

$$h = \frac{g}{2}t^2, \text{ wobei die Erdbeschleunigung } g \cong 10\text{m/s}^2$$

a) Vergleichen Sie die Geschwindigkeit v_0 mit der Lichtgeschwindigkeit:

$$c = 3 \times 10^8\text{m/s}.$$

b) Benutzen Sie $v_0 = c = 3 \times 10^8\text{m/s}$ und rechnen Sie den Abstand h für diese Anfangsgeschwindigkeit aus. Vergleichen Sie diesen Abstand h mit dem Atomdurchmesser (Nehmen Sie an: $\theta_{Atom} = 10^{-10}\text{m}$).

Natürlich müssen sich die Lichtteilchen wesentlich von Bällen unterscheiden. Im Gegensatz zu Bällen behindern sie sich gegenseitig nicht. Deshalb müssen die "Bällen eines Lichtbündels" so außerordentlich klein sein, dass selbst beim Zusammentreffen zweier intensiver Lichtbündel die Wahrscheinlichkeit äußerst gering ist, dass ein Teilchen des einen Bündels mit einem Teilchen des anderen zusammenstößt. Auf diese Weise kann man das Ausbleiben der Wechselwirkung von Licht mit Licht im Teilchenmo-

dell erklären.

Die hypothetischen Lichtteilchen unterscheiden sich also durch ihre hohe Geschwindigkeit und durch ihre geringe Größe von normalen Teilchen wie etwa Bällen. Wenn man sich dieser Unterschiede stets bewusst bleibt, kann man versuchen, andere Eigenschaften von Lichtbündeln vorherzusagen, indem man das Verhalten von Bällen oder Kugeln untersucht.

Interessanter sind nun die Deutungsversuche zur Reflexion und Brechung des Lichts. Da Newton sehr kleine Lichtteilchen annehmen musste, konnte er bei der Reflexion keine ebene Wand voraussetzen. Im Vergleich zu den Lichtteilchen musste ja jede Oberfläche "hügelig" erscheinen. Er nahm an, dass zwischen den Lichtteilchen und den Teilchen der Oberfläche des spiegelnden Mediums abstoßende Kräfte wirken, die zu der in Abb. A.4 dargestellten Bahn der Lichtkorpuskel führen. Diese abstoßenden Kräfte standen ihm dann allerdings bei der Deutung der Brechung im Wege, bei der er anziehende Kräfte zwischen Lichtteilchen und Medium voraussetzen musste. Er half sich mit der etwas komplizierten Hypothese: Jedes Lichtteilchen wechselt periodisch seinen Zustand zwischen der "Anwandlung leichter Reflexion" und der "Anwandlung leichten Durchgangs". Je nachdem, in welchen Zustand es sich befindet, wird es reflektiert oder dringt in das Medium ein.

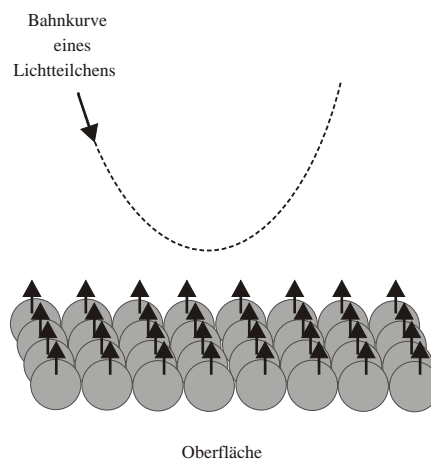


Abbildung A.4: *Reflexion*

Das Reflexionsgesetz

Trifft Licht auf die Oberfläche eines Körpers, so wird es reflektiert. Verhalten sich nun Teilchen, beispielsweise Kugeln, genauso? Zur Beantwortung dieser Frage stellen wir uns das folgende Gedankenexperiment vor: Wir Werfen einige Kugeln gegen verschiedene Oberflächen. An glatten, ebenen Platten prallen die Kugeln regelmäßig unter einem Reflexionswinkel ab, der annähernd so groß wie ihr Einfallswinkel ist. Einfallsweg und Reflexionsweg liegen in einer Ebene mit der Normalen zur Oberfläche; auch ändert sich die Geschwindigkeit nach dem Auftreffen auf die Oberfläche nicht. Sind aber Kugeln und Oberflächen weniger elastisch als Stahl, so springt der Ball nicht unter dem gleichen Reflexionswinkel zurück. In solchen Fällen ist auch die Geschwindigkeit der Kugel nach der Reflexion kleiner als vorher. Im Unterschied zum Licht, das seine Geschwindigkeit bei der Reflexion nicht ändert. Da das Licht an glatten Oberflächen wie an Spiegeln reflektiert wird, haben wir anzunehmen, dass die Lichtteilchen wie ideale Bälle reflektiert werden, die man gegen eine elastische Wand wirft. Beschränkt man das Modell auf solche elastischen Teilchen und stellt sich vor, dass Stöße der Lichtteilchen gegen die Oberfläche elastisch erfolgen, so lässt sich die regelmäßige Reflexion erklären. Damit macht das Teilchenmodell von Newton die Reflexion des Lichts an Spiegeln hinreichend verständlich.

Das Brechungsgesetz

Warum musste Newton zur Erklärung der Brechung anziehende Kräfte zwischen den Lichtteilchen und dem brechenden Medium, also etwa dem Glas, annehmen? Würden die Lichtteilchen trotz abstoßender Kräfte infolge ihres besonderen Zustandes (Anwandlung des leichten Durchgangs) in das Glas eindringen, so wirkte das Glas bremsend auf sie, ihre zur Glasoberfläche senkrechte Geschwindigkeitskomponente nähme ab, und da die zum Glas parallele Komponente durch eine zu ihr senkrechte Kraft nicht beeinflusst werden kann, bedeutete das eine Brechung des Lichtstrahls vom Lot weg, was der Erfahrung widerspricht (s. Abb. A.5 a). Daher glaubte Newton an anziehende Kräfte, wahrscheinlich Gravitationskräfte, die erst bei sehr großer Annäherung der Lichtteilchen an die Glasoberfläche wirken, indem sie die Geschwindigkeitskomponente vergrößern (s. Abb. A.5 b).

Die Auffassung des Lichts als Teilchenbewegung und die konsequente Anwendung der Bewegungsgesetze der Mechanik ergeben nun die Aussage, dass *Licht im dichteren Medium schneller als im dünneren* sein muss.

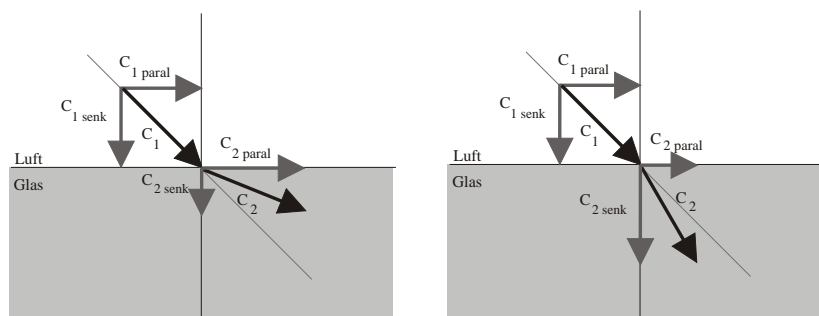


Abbildung A.5: *Brechung a) und b)*

Da zu Newtons Zeit keine experimentelle Überprüfbarkeit zur Messung der Lichtgeschwindigkeit in verschiedenen Medien bestanden, hat die Beantwortung der Frage, ob Licht sich im dichteren Medium schneller (nach dem Teilchenmodell) oder langsamer (nach dem Wellenmodell) ausbreitet, noch vielen Jahre gedauert.

Die Stellung des Teilchenmodells

Es wurde versucht, ein Modell für das Licht zu entwickeln, das auf dem Verhalten von Teilchen aufbaut. Dieser Versuch war von Erfolg gekrönt, solange wir nur einige bekannte optische Erscheinungen betrachteten und solange wir nicht eine genaue zahlenmäßige Übereinstimmung zwischen der Vorhersage der Theorie und den Ergebnissen der Experimente verlangten.

In einem Modell lassen sich mit Erfolg viele schon bekannte Eigenschaften zusammenfassen, indem es ein Bild liefert, in das unser Wissen passt. Es legt andererseits auch nahe, an Eigenschaften zu denken, von denen wir keine Ahnung gehabt haben. Es liefert den Schlüssel zur Entdeckung unerwarteter Erscheinungen, die dem Modell nach vorhanden sein müssten. Damit gibt es die Möglichkeit, das Modell zu überprüfen, indem man im Experiment die Natur mit den Vorhersagen des Modells vergleicht.

Bei der Problematik der Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit in verschiedenen Medien erfahren wir eine Situation, die bei Physikern häufig auftritt. Von Zeit zu Zeit versagt ein Modell bei der Erklärung einer neuen Beobachtung, während es bis dahin

mit Erfolg eine Reihe von experimentellen Ergebnissen und Beobachtungen zusammenfassend beschrieben hatte. Dann muss man das Modell abändern oder fallen lassen und versuchen, ein neues zu entwickeln. Meistens sind aber die Anstrengungen, die man in das nun überholte Modell hineinsteckte, nicht unnötig gemacht worden. Die klassische Teilchentheorie hat zwei Ziele erreicht: Sie hat einerseits gezeigt, dass man eine Reihe von Beobachtungen in der Tat aufeinander beziehen kann; und sie hat andererseits neue Experimente veranlasst. Die Teilchentheorie, die hier als unzureichend für die Erklärung der Lichtgeschwindigkeit erscheint, hat einen bedeutungsvollen Platz in der Geschichte der Physik eingenommen. Diese Episode der Physikgeschichte stellt ein gutes Beispiel dar, wie die physikalische Kenntnis entwickelt wird. Man "entwirft ein Bild von der Wirklichkeit und prüft es auf seine Zuverlässigkeit" und dies ist ein nie endender Prozess. Deswegen spricht man nicht von richtigen oder genauen Modellen, sondern von beobachtungsnahen physikalischen Modellen.

1. Unterrichtsfeld: Konkreter Umgang

4. Informationsblatt zum Themenbereich: Ein Wellenmodell für das Licht

(Der Text zu diesem Infoblatt besteht aus Textteilen und adaptierten Textteilen von "Physik Band II/Teil 2 – Höfling, 1983" und von "Kuhn Physik, IIID, 1985")

Das Reflexionsgesetz kann mit Hilfe des Teilchen- und des Wellenmodells in gleicher Weise erklärt werden, auch das Brechungsgesetz kann mit Hilfe von beiden Modellen erklärt werden. Es ergibt sich aber ein Unterschied zwischen beiden Vorstellungen: Die konsequente Anwendung des Wellenmodells ergibt die Aussage, dass *Licht im optisch dichteren Medium langsamer als im dünneren* sein muss.

Mit der Möglichkeit der experimentellen Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit in verschiedenen Medien konnte eine lange Auseinandersetzung über zwei widersprüchliche Modelle (Teilchen- und Wellenmodell) für das Licht entschieden werden.

Bei der Behandlung der allgemeinen Wellenlehre wurde bereits in der Mechanik darauf hingewiesen, dass die Beobachtung von Interferenzerscheinungen bei unbekanntem physikalischen Vorgängen eine Beschreibung dieser Vorgänge nur durch das Wellenbild ermöglicht. Wenn es also gelingen sollte, beim Licht Interferenzerscheinungen festzustellen, so würde dies ein weiterer Nachweis dafür sein, dass die Ausbreitung des Lichts durch das Wellenmodell und nicht durch das Teilchenmodell besser beschrieben wird. Interferenzerscheinungen sind charakteristisch für Wellen.

Der Standpunkt des 19. Jahrhunderts war: *Licht ist Welle*. Das ist voll ausformuliert in den Maxwell'schen Gleichungen, die zu den wichtigsten Meilensteinen der klassischen Physik gehören. Was schwingt bei einer elektromagnetischen Welle? Es sind die beiden fundamentalen Felder dieser Theorie (das elektrische Feld und das magnetische Feld), die ihre physikalische Natur direkt durch ihre Wirkungen auf Ladungen offenbaren.

Zwei auf einen Schirm fallende Lichtwellen können interferieren (d.h. einander überlagern), weil ihre Felder addiert werden. Zeigt etwa in einem Punkt des Raums das elektrische Feld der einen Teilwelle nach oben, das der anderen nach unten, und haben beide den gleichen Betrag, so ist das resultierende elektrische Feld in diesem Raumpunkt Null. Trifft dasselbe auch für die magnetischen Felder zu (etwa: eines zeigt nach rechts, eines nach links), so findet in diesem Punkt vollständige Auslöschung (destruktive Interferenz) statt. Analog können zwei Teilwellen einander maximal verstärken (konstruktive Interferenz).

Wir werden an dieser Stelle versuchen, das Wellenmodell für das Licht mit Hilfe einer Analogie zu Seilwellen zu verstehen und so mit Hilfe direkt sichtbarer Seilwellen einige Eigenschaften von elektromagnetischen Wellen (Licht) zu verdeutlichen.

Seilwellen

Wenn wir ein Seil durch eine entsprechende Bewegung in eine harmonische Schwingung versetzen, breitet sich eine sinusförmige Welle aus. So kann man Wellenberg und Wellental unterscheiden.

Die Wellenlänge der Welle, die mit λ bezeichnet wird, kann man nun von Wellenberg zu Wellenberg messen.

Die Wellenlänge stellt die räumliche Periode der Welle dar. Sie steht in einem grundsätzlichen Zusammenhang mit der Schwingungsdauer T , der zeitlichen Periode. Demnach ergibt sich für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit c der Welle die Beziehung: $c = \frac{\lambda}{T}$.

Den Kehrwert der Schwingungsdauer bezeichnet man als Frequenz: $f = \frac{1}{T}$.

Die gleichartigen Bewegungszustände bezeichnet man als Zustände gleicher Phase.

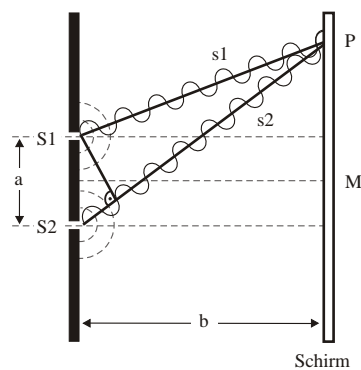
Um den Ablauf einer Wellenbewegung mathematisch zu beschreiben, kann man eine Koordinate x in der Fortpflanzungsrichtung der Welle einführen und eine Koordinate y senkrecht dazu. y misst die Auslenkung des Seiles, während x die Stelle angibt, an der das Seil gerade betrachtet wird. Mathematisch lässt sich nun eine solche Welle mit Hilfe einer sinusförmigen Funktion wie: $y = y_0 \sin\left(t - \frac{x}{c}\right)$ darstellen, wobei y ist die Elongation und y_0 die Amplitude der Welle ist.

Demonstrationsversuche: Interferenz von Seilwellen

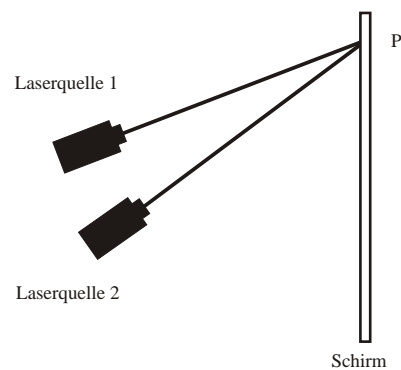
Über ein Seil lassen wir zwei gleichartige Wellen in entgegengesetzter Richtung laufen, indem wir es an beiden Enden in der gleichen Weise anregen. In der Mitte überlagern sich die beiden Wellen, ihre Auslenkungen addieren sich. Dabei entsteht bei gleichgerichteten Ausschlägen eine Verdoppelung zum Gesamtausschlag und bei entgegengesetzten Auslenkungen eine Auslöschung.

Bei Wellenerscheinungen tritt also beim Zusammentreffen mehrerer Wellen eine Überlagerung auf, indem sich die Ausschläge addieren. Dabei erfolgt bei gleichgerichteten Ausschlägen Verstärkung der Auslenkung und bei entgegengesetzten Ausschlägen Schwächung oder Auslöschung. Diese Erscheinung wird Interferenz von Wellen genannt.

Kann man Interferenz beim Licht wahrnehmen?



Interferenzerscheinung ?



Interferenzerscheinung ?

1. Unterrichtsfeld: Konkreter Umgang**5. Arbeitsblatt zum Themenbereich: Aufbau des Mach-Zehnder-Interferometers**

(Die Aufgaben zu diesem Arbeitsblatt wurden von D. Knebel und M. B. Fagundes entwickelt)

Es gibt zahlreiche experimentelle Anordnungen, die als Interferometer bezeichnet werden. Ein Interferometer dient zur Untersuchung von Interferenzphänomenen. Ein in der Physik sehr bekanntes Interferometer ist das Michelson-Morley-Interferometer. Mit Hilfe dieses Interferometers wurden die Aussagen der Relativitätstheorie von Einstein experimentell untersucht.

In den folgenden Unterrichtsstunden werden wir ein besonderes Interferometer näher kennenlernen, und zwar das Mach-Zehnder-Interferometer. Dieses Interferometer wurde bereits am Ende des 19. Jahrhunderts entwickelt. Damals gelang es, dieses Interferometer zur Erzeugung von Interferenzen und zur Messung der Wellenlänge von Licht zu benutzen. Das Mach-Zehnder-Interferometer wurde von L. Zehnder und, unabhängig von ihm, auch von L. Mach gleichzeitig entwickelt. Mach und Zehnder hatten sich das Ziel gesetzt, die Brechzahlen von verschiedenen Körpern mit Hilfe dieses Interferometers zu bestimmen. Die Wellennatur des Lichts war zu dieser Zeit allgemein akzeptiert.

Das Mach-Zehnder-Interferometer arbeitet auf folgende Weise: Ein Lichtbündel wird durch einen Strahlteiler in zwei Teile zerlegt. Diese Teilbündel laufen entlang verschiedener Wege, bis sie durch Spiegel umgelenkt werden und wieder auf den Weg zu Schirmen kombiniert werden. Die auf die Schirme fallenden Bündel bestehen jeweils aus zwei zusammengeführten Teilbündeln. Da die Teilbündel über lange Strecken getrennte Wege durchlaufen (dies ist beim Michelson-Interferometer nicht der Fall), sind die an diesem Interferometer durchgeführten Experimente einfacher zu durchschauen und dadurch didaktisch wertvoller als bei anderen Interferometern.

Materialliste: Interferometer-Grundplatte mit schwenkbarem Befestigungsarm und Justierschrauben für den Laser, ein He-Ne-Laser, zwei Strahlteiler, zwei feinjustierbare Oberflächenplanspiegel, zwei Irisblenden (nur zum Vorjustieren der einzelnen Geräte auf der Grundplatte), zwei Sammellinsen: $f = 5\text{mm}$ und $f = 50\text{mm}$ (zur Aufweitung des Parallellaserbündels), zwei Mattschirme, ein Maßstab, diverse Haftmagnetmuffen für die einzelnen Geräte.

Aufgabe: (Gruppenarbeit):

1.1) Laser am Befestigungsarm anbringen.

1.2) Die zwei Spiegel und die zwei Strahlteiler auf die Grundplatte jeweils in die Ecke eines gedachten Quadrates stellen, wobei sowohl die zwei Spiegel als auch die Strahlteiler jeweils durch eine Diagonale des Quadrates verbunden werden können. Die Kantenlänge des gedachten Quadrates betrage in etwa 30 cm. Das Laserbündel trifft zuerst einen Strahlteiler.

1.3) Die Spiegel und die Strahlteiler sollen so aufgestellt werden, dass:

a) das Laserbündel am ersten Strahlteiler um 90^0 reflektiert wird und auch transmittiert.

b) das reflektierte Laserbündel vom ersten Spiegel wiederum um 90^0 reflektiert wird, so dass es nicht antiparallel, sondern parallel zum transmittierten Bündel verläuft.

c) das transmittierte Laserbündel von dem zweiten Spiegel ebenfalls um 90^0 reflektiert wird, so dass es nicht antiparallel, sondern parallel zum transmittierten Bündel aus a. verläuft.

d) die an den beiden Spiegeln reflektierten Laserbündel wieder an dem zweiten Strahlteiler zusammentreffen.

1.4) Den zweiten Strahlteiler so aufstellen, dass jedes der beiden Teilbündel zum Teil um 90^0 aus seiner Richtung abgelenkt wird, und zum Teil in seiner ursprünglichen Orientierung weiterlaufen kann, so dass:

a) zwei Paare von je zwei Teilbündeln erzeugt werden.

b) jedes Paar von zwei parallel und in sich verlaufenden Teilbündeln auf je einen Schirm treffen, welche in etwa 20 cm Entfernung von der Grundplatte senkrecht zueinander und zur Grundplatte aufgestellt werden.

1.5) Die Sammellinsen so vor den ersten Strahlteiler in den Strahlengang bringen, dass eine Lichtbündelaufweitung um den Faktor 10 stattfindet (Bündel soll weiterhin fast parallel bleiben).

2. Unterrichtsfeld: Zielgerichtete Beobachtung

1. Arbeitsblatt zum Themenbereich:

Justierung des Mach-Zehnder-Interferometers

(Die Aufgaben zu diesem Arbeitsblatt wurden von D. Knebel und M. B. Fagundes entwickelt und der Text besteht aus Teilen und adaptierten Textteilen aus "Metzler-Physik, 1998")

Interferenzerscheinungen sind eine typische Welleneigenschaft. Wir haben bereits das Interferometer aufgebaut und wahrscheinlich noch keine erwünschten Interferenzmuster auf den Schirmen beobachten können.

In der Schulphysik wird häufig das Experiment als alleinige Quelle der Erkenntnis angesehen, als ob Erkenntnis aus bloßer Beobachtung von Experimenten gewonnen werden könnte. Solche naive empirische Denkweise, die nur das auf Erfahrung gegründete Denken gelten lassen will, ist aber gefährlich.

Physik ist eine theoriegeleitete, experimentelle Wissenschaft. Physikalische Experimente werden erst durch Theorien möglich, sie sind deswegen keine bloße Beobachtung. Experimente können aber auch über Theorien entscheiden, wie wir im Fall des Brechungsgesetzes gesehen haben.

Daher kann ohne physikalische Begriffsbildung weder ein Versuch geplant (Was will ich messen oder beobachten?) noch können Ergebnisse festgehalten werden (Was wurde gemessen oder beobachtet?). Ebenso liegen der Verwendung der Geräte, mit denen das Experiment durchgeführt wird, schon theoretische Betrachtungen zugrunde, z.B. etwas über das Funktionieren eines Interferometers. Der Apparat ist aufgrund einer schon vorhandenen Theorie (Wellenmodell für das Licht) konstruiert und verständlich.

Gerade bei dem Mach-Zehnder-Interferometer werden wir erfahren, dass die Justierung der experimentellen Anordnung gar nicht elementar ist. Die Beobachtung der gewünschten Interferenzmuster gelingt in diesem Interferometer erst, wenn eine Vielzahl von Annahmen über das Verhalten des Lichts gemacht worden sind. Das heißt: Wir nehmen an, dass beim Licht Interferenzmuster im Interferometer zu beobachten sind, dann versuchen wir das Interferometer so gut zu justieren, dass die Interferenzmuster erscheinen. Also können Experiment und Theorie in der Praxis nicht getrennt werden, und ohne bereits eine Vorstellung zu haben, kann man keine Naturbeobachtungen auswerten und kein zielgerichtetes Experiment entwerfen.

In den folgenden Unterrichtsstunden werden wir uns mit der Justierung des Interferometers beschäftigen, d.h die Interferenzmuster zu beobachten versuchen. Das ist aber keine einfache Aufgabe. Nun achten Sie auf die folgende Prozedur - und viel Spaß!

Materialliste: Interferometer-Grundplatte mit schwenkbarem Befestigungsarm und Justierschrauben für den Laser, ein He-Ne-Laser, zwei Strahlteiler, zwei feinjustierbare Oberflächenplanspiegel, zwei Irisblenden (nur zum Vorjustieren der einzelnen Geräte auf der Grundplatte), zwei Sammellinsen: $f = 5\text{mm}$ und $f = 50\text{mm}$ (zur Aufweitung des Parallellaserbündels), zwei Mattschirme, ein Maßstab, diverse Haftmagnetmuffen für die einzelnen Geräte.

Aufgabe: (Gruppenarbeit)

- 1) Schwenkbare Befestigung an die Grundplatte montieren.
- 2) Laser mit der Stativstange in Befestigung fixieren und anschließen.
- 3) Beide Irisblenden in zwei Haftmagnetmuffen so fixieren, dass bei kleinstem Blendendurchmesser die Öffnungen auf gleicher Höhe über der Grundplatte stehen.
Achtung: Diese Blendenhöhen dürfen nicht mehr verstellt werden!
- 4) Alle vier Spiegel, die beiden Sammellinsen und die kurze Stativstange so in sieben Haftmagnetmuffen fixieren, dass das Laserbündel am anderen Ende der Grundplatte in etwa auf den jeweiligen Spiegel- bzw. Linsenmittelpunkt fällt oder die obere Stativstangenfläche streift.
- 5) Sie bekommen nun vom Lehrer eine Schablone auf die Grundplatte gelegt, die Ihnen die Ecken des gedachten Quadrats für den Aufbau vorgibt.
- 6) Stellen Sie einen der Oberflächenspiegel so in die Mitte der Öffnung B, dass das Laserbündel um 90° in Richtung C umgelenkt wird.
- 7) Bringen Sie nun die beiden Irisblenden in die Positionen A und C.
- 8a) Nun haben Sie die schwierige Aufgabe, den Schwenkarm, die Justierschrauben für den Laser und die Justierschrauben für den Oberflächenspiegel so einzustellen, dass das einfallende Laserbündel des Oberflächenspiegels durch die Blende A und das reflektierte Laserbündel durch die Blende C fällt.
- 8b) Tauschen Sie nun die Blenden A und C aus. Der Lichtweg darf jetzt durch keine der zwei Blenden behindert werden.

8c) Ist Schritt 8b nicht gelungen, müssen Sie nachjustieren, d.h. Schritt 8a und danach wieder Schritt 8b solange durchführen, bis Sie die Blenden in A und C beliebig tauschen können. Erst wenn Ihnen Schritt 8c gelungen ist, können sie sicher sein, dass das einfallende und reflektierte Laserbündel jeweils parallel bezüglich der Grundplatte verlaufen.

9) Irisblende aus A entfernen und in die Mitte der Öffnung D einsetzen; Strahlteiler in A einsetzen, so dass diese Spiegelfläche in etwa parallel zur Spiegelfläche in B steht.

10) Überprüfen Sie die Stellung des Strahlteilers. Drehen Sie ihn ggf. so in A, dass das von ihm reflektierte Laserbündel durch die Blende in D fällt.

11) Entfernen Sie die Irisblende in D und stellen Sie den anderen Oberflächenspiegel in die Mitte der Öffnung D, so dass das Laserbündel wieder um 90^0 umgelenkt wird in Richtung C und diese Spiegelfläche auch in etwa parallel zur Spiegelfläche in A und B steht.

12) Drehen Sie die Irisblende in C um 90^0 und justieren Sie den Spiegel in D so, dass das Laserbündel durch die Blende in C ungehindert hindurchtreten kann.

13) Irisblende in C entfernen. Setzen Sie die kurze Stativstange so in C ein, dass die beiden Teilbündel sich in der Stangenlängsachse treffen. Entfernen Sie nun die Stange aus der Muffe, ohne die Muffe auf der Grundplatte zu bewegen, und setzen Sie den anderen Strahlteiler stattdessen ein. Nehmen Sie den Spiegel dazu aus seiner Muffe heraus.

Diese Muffenstellung darf nicht mehr verstellt werden!

14) Drehen Sie den Strahlteiler innerhalb der feststehenden Muffe in C so, dass eine Spiegelfläche parallel zu den anderen drei Spiegelflächen steht und die beiden Teilbündel auf den beiden Projektionsflächen (in 4m Entfernung ggf. auf Wand) möglichst nahe beieinander liegen.

15) Stellen Sie die Sammellinsen so in Öffnung F auf, dass die Linsenmittelpunkte in etwa 5,5 cm voneinander entfernt sind und dass das Primärlaserbündel direkt diese Linsenmittelpunkte trifft (d.h. die beiden Oberflächenspiegel müssen weiterhin mittig vom aufgeweiteten Lichtbündel getroffen werden: halten Sie zum Test ein weißes Blatt Papier vor die Oberflächenspiegel). Verkleinern Sie die Entfernung solange, bis Sie auf dem Schirm (4m Entfernung) das Laserbündel nahezu vollständig in einem Punkt ab-

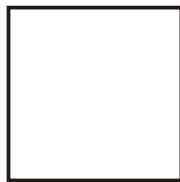
bilden.

16) Justieren Sie vorsichtig die Oberflächenspiegel nach, so dass die beiden Teilbündel jeweils ineinander verlaufen.

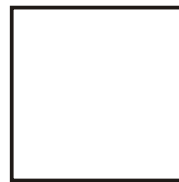
17) Stellen Sie die Linsen wieder in eine Entfernung von 5,5 cm oder etwas mehr.

18) Heureka, heureka, wir haben die Interferenzmuster gesehen!

19) Skizzieren Sie, was Sie auf den Schirmen nach der Justierung des Interferometers beobachtet haben.



Schirm 1



Schirm 2

3. Unterrichtsfeld: Idealisierung

1. Arbeitsblatt zum Themenbereich: Idealisierung des MZ-Interferometers

(Die Aufgaben zu diesem Arbeitsblatt wurden von D. Knebel und M. B. Fagundes entwickelt und der Text besteht aus Teilen und adaptierten Textteilen aus “Kuhn-Physik/Band IIID, 1975”)

Wir werden jetzt das beobachtete Phänomen, nämlich Interferenzerscheinungen im realen Mach-Zehnder-Interferometer, mit Hilfe der physikalischen Modellvorstellung Welle zu verstehen versuchen.

Dieses Verstehen bezieht sich aber nicht mehr auf die Wirklichkeit, nämlich auf das reale Phänomen, sondern auf eine gedanklich konstruierte Wirklichkeit, d.h. auf ein idealisiertes Phänomen (das Phänomen ohne Berücksichtigung der experimentellen Schwierigkeiten).

Das idealisierte Phänomen ist deswegen nicht auf die gleiche Weise real wie das beobachtete Phänomen. Das idealisierte Experiment ist nun eine konstruierte Wirklichkeit, die nicht mit der Wirklichkeit gleich gesetzt werden darf.

Was bedeutet eine physikalisch konstruierte Wirklichkeit?

Wir machen uns dies an einem bekannten Beispiel der Geschichte der Physik klar:

Beim Studium der Fallbewegung erkannte Galilei, dass man in der Natur ablaufende unübersichtliche und komplexe Vorgänge nur dann physikalisch erfassen kann, wenn man sie von zufälligen und störenden Nebenwirkungen befreit, sie also *idealisiert* - und *in einfachen Modellen eine neue physikalische Wirklichkeit gleichsam als “zweite” oder “künstliche” Natur konstruiert*. Der Gegenstand physikalischer Forschung ist es also, auf Grund von Beobachtungen Modelle der physikalischen Wirklichkeit zu entwerfen. Grundlagen dieser Modellierung sind Zahlen und mathematische Strukturen, also gedankliche Konstruktionen.

Der Bezug zur Realität wird dadurch garantiert, dass die Modellvorstellungen im Experiment – als Frage an die Natur - laufend überprüft und verbessert werden.

Das idealisierte Phänomen bedeutet am Beispiel unseres Interferometers, die experimentellen Störungen wie Fehler auf den Spiegeln und Linsen außer acht zu lassen. Außerdem werden wir den Lichtstrahl im genau justierten Interferometer betrachten. Also fangen wir jetzt an, das idealisierte Mach-Zehnder-Interferometer aufzubauen.

1. Aufgabe

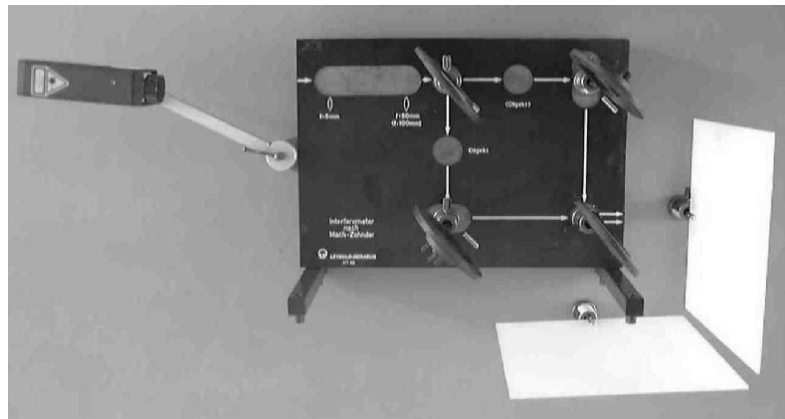


Abbildung A.6: *Das Mach-Zehnder-Interferometer*

1.1) Zeichnen Sie den Verlauf aller vorkommenden Lichtstrahlen direkt in das Bild (s. Abb. 1) und beschriften Sie die für den Lichtbündelverlauf wichtigen Einzelteile im Bild.

1.2) Schematisieren Sie bitte das Mach-Zehnder-Interferometer und skizzieren Sie auch den Lichtweg in Ihrem Schema.

1.3) Stellen Sie in Ihrem Schema nur die Bauteile dar, die für die Erlangung der Interferenz notwendig sind.

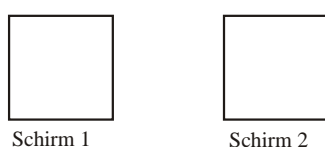
1.4) Fragen zu diesem idealisierten Schema:

- Worin bestehen die Unterschiede zwischen Lichtbündel und Lichtstrahl?
- Worin bestehen die Unterschiede zwischen realem und idealisiertem Interferometer?
- Wozu kann eine solche idealisierte Vorstellung nützlich sein?

2. Aufgabe

Ab hier wollen wir in diesem Schema Gedankenexperimente durchführen. Diese sind zwar keine Experimente in der Realität, doch müssen auch in ihnen dieselben physikalischen Gesetzmäßigkeiten gelten wie in der Realität.

2.1) Was, meinen Sie, ist auf den Schirmen im schematisierten Interferometer zu sehen?



2.2) Wie oft werden die Teilstrahlen auf ihren Wegen vom Laser zu den Schirmen transmittiert (T) und reflektiert (R)?

Schirm 1, Weg oben:

Schirm 2, Weg oben:

Schirm 1, Weg unten:

Schirm 2, Weg unten:

2.3) Wieviel Prozent der Lichtintensität trifft jeweils ein?

Schirm 1:

Schirm 2:

2.4) Was könnte man also aus diesem Gedankenexperiment für eine Idee (Theorie) entwickeln für das Verhalten einer Lichtwelle bei Reflexionen an einem Spiegel und bei Transmissionen durch einen Spiegel?

Bei R:

Bei T:

Wovon wäre das Verhalten beim Vorgang T abhängig?

2.5) Was passiert Ihrer Meinung nach, wenn wir im Weg unten zwischen dem 2. Spiegel und dem 2. Strahlteiler ein lichtdurchlässiges Hindernis einbauen?

3. Unterrichtsfeld: Idealisierung

2. Arbeitsblatt zum Themenbereich:

Wellenmodell des Lichts im idealisierten MZ-Interferometer

Wie funktioniert das Mach-Zehnder-Interferometer?

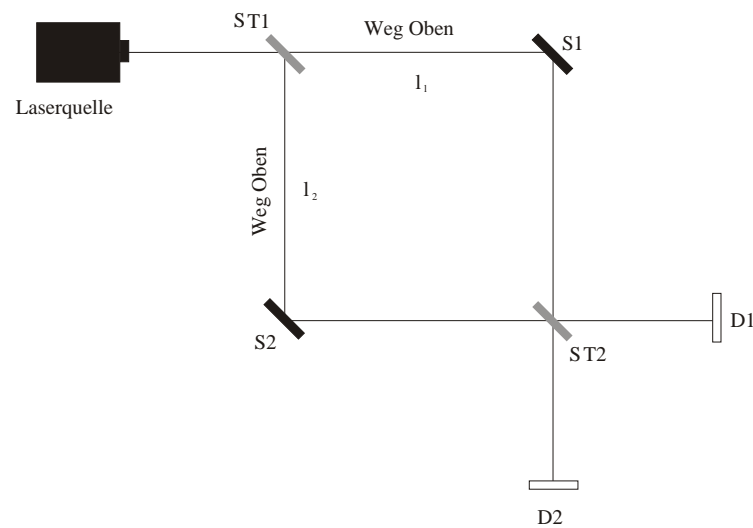


Abbildung A.7: Das Mach-Zehnder-Interferometer: Idealfall

ST_1 und ST_2 : Strahlteiler (es seien ST_1 und ST_2 identisch).

S_1 und S_2 : Spiegel (Es seien S_1 und S_2 identisch).

D_1 und D_2 : Spiegel (Es seien D_1 und D_2 identisch).

Es seien ST_1 , S_1 , ST_2 und S_2 miteinander parallel. ST_2 , S_2 , ST_2 und S_2 werden in die Ecken eines gedachten Quadrates positioniert. Es seien l_1 bzw. l_2 die gesamten Weglängen für das Licht, das sich von der Lichtquelle bis zu den Schirmen auf dem oberen bzw. unteren Weg ausbreitet.

Wir nehmen an, dass der Durchgang des Lichts durch das Glas im Strahlteiler einer Phasenverschiebung von $2\pi s/\lambda$ entspricht, wobei s die optische Weglänge durch den Strahlteiler darstellt. (Man bezeichnet das Produkt aus der Brechzahl und der geometri-

schen Weglänge als die optische Weglänge ¹).

Die Phasenverschiebungen für den “Weg Unten” l_2 zum Schirm D_1 betragen:

π für die erste Reflexion an ST_1

π für die zweite Reflexion an S_2

$2\pi s/\lambda$ für den Lichtdurchgang durch ST_2 und

$2\pi l_2/\lambda$ für den gesamten durchlaufenen Weg von der Quelle bis zum Schirm D_1

Also lautet die gesamte Phasenverschiebung für den “Weg Unten” zu D_1 :

$$2\pi + 2\pi \left(\frac{l_2 + s}{\lambda} \right)$$

Wird nun in Analogie zur Betrachtung des unteren Weges der “Weg Oben” zum Schirm D_1 betrachtet, erhalten wir die folgenden Phasenverschiebungen:

$2\pi s/\lambda$ für Lichtdurchgang durch ST_1

π für die erste Reflexion an S_1

π für die zweite Reflexion an ST_2 und

$2\pi l_1/\lambda$ für den gesamten durchlaufenden Weg von der Quelle bis zum Schirm D_1

Also gilt für den gesamten “Weg Oben” zu D_1 :

$$2\pi + 2\pi \left(\frac{l_1 + s}{\lambda} \right)$$

Daraus folgt für die Phasendifferenz zwischen den beiden Wegen “Unten” und “Oben” zum Schirm D_1 :

$$2\pi + 2\pi \left(\frac{l_2 + s}{\lambda} \right) - 2\pi - 2\pi \left(\frac{l_1 + s}{\lambda} \right) = 2\pi \left(\frac{l_2 - l_1}{\lambda} \right) = \delta \quad (1)$$

¹Die vom Licht in gleichen Zeiten zurückgelegten geometrischen Weglängen sind in den verschiedenen Medien verschieden, während die optischen Weglängen in gleichen Zeiten für alle Medien gleich groß sind.

Übung:

Wird in Analogie zur Betrachtung der Teilwellen zum Schirm D_1 der Phasenunterschied zwischen den beiden Teilwellen auf l_1 und l_2 zum Schirm D_2 angenommen, so gilt:

Die Phasenverschiebungen für den "Weg Unten" (s. Abb. 1) zum Schirm D_2 betragen (bitte wie bei D_1 angeben):

π für
 π für
 $2\pi s/\lambda + 2\pi s/\lambda$ für
 $2\pi l_2/\lambda$ für
 Die gesamten Phasenverschiebungen für den "Weg Unten" zu D_2 ist:

Die Phasenverschiebung für den "Weg Oben" (s. Abb. A.7) zum Schirm D_2 betragen:

$2\pi s/\lambda$ für
 π für
 $2\pi s/\lambda$ für
 $2\pi l_1/\lambda$ für
 Die gesamten Phasenverschiebung für den "Weg Oben" zu D_2 ist:

Daraus folgt für die Phasendifferenz zwischen den beiden Wegen "Unten" und "Oben" zum Schirm D_2 :

$$2\pi + 2\pi \left(\frac{l_2+2s}{\lambda} \right) - \pi - 2\pi \left(\frac{l_1+2s}{\lambda} \right) = \pi + 2\pi \left(\frac{l_2-l_1}{\lambda} \right) = \pi + \delta \quad (2)$$

Setzen wir in (1) und (2) $\delta = 0$ für die Phasenverschiebung entsprechend dem Wegunterschied zwischen l_1 und l_2 , d.h. nehmen wir l_1 gleich l_2 , erhalten wir daher konstruktive Interferenz am Schirm D_1 und destruktive Interferenz am Schirm D_2 .

4. Unterrichtsfeld: Rationale Rekonstruktion

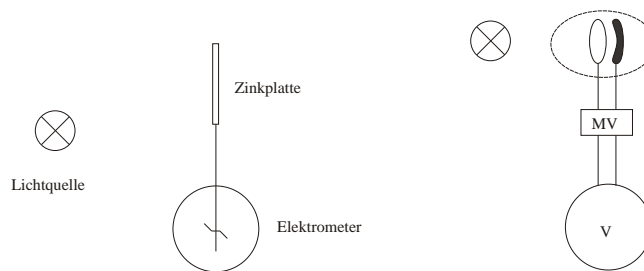
1. Arbeitsblatt zum Themenbereich: Fotoeffekt

(Der Text zu diesem Arbeitsblatt ist aus der Unterrichtsvorschlag Modellbildung in der Physik von J. Küblbeck, 1997)

Zur Einführung: Der Äußere Fotoeffekt

Wird eine Metallschicht mit Licht bestrahlt, so können sich Elektronen aus der Schicht lösen. Nachweis:

1. Zinkplatte wird negativ geladen. Mit einem Elektrometer ist bei Bestrahlung der Platte mit kurzwelligem Licht eine Ladungsabnahme beobachtbar.
2. Abgelöste Elektronen treffen in einem evakuierten Glaskolben auf einen Metallring auf. Die sich dadurch aufbauende Spannung wird gemessen.



- zu 2: Schnelle Elektronen (viele oder wenige!) \Leftrightarrow hohe Spannung
 Langsame Elektronen (viele oder wenige!) \Leftrightarrow niedrige Spannung

Wellenlänge in nm	405	436	546	578
Gegenspannung in V	0.82	0.81	0.34	0.27

Die Erwartungen nach dem Wellenmodell:

1. Mit steigender Lichtintensität werden die Elektronen schneller.
2. Mit steigender Frequenz werden die Elektronen (bei gleicher Lampenleistung) nicht schneller.



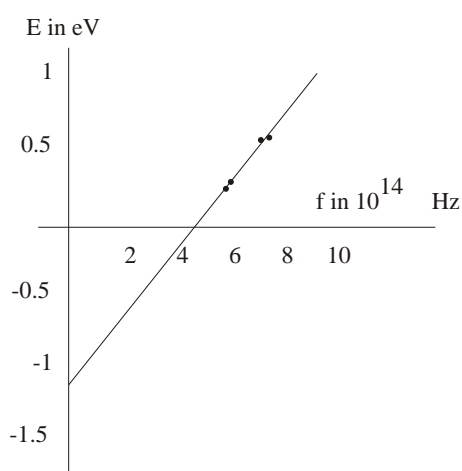
Experimentelle Ergebnisse:

1. Mit steigender Lichtintensität werden die Elektronen nicht schneller.
2. Höherfrequentes Licht verursacht größere Elektronengeschwindigkeiten.

Teilchenmodell: Licht wird in Quanten *ganz* oder *gar nicht* einzeln absorbiert.

Je größer die Frequenz des Lichts, umso größer sind die Energieportionen der Lichtquanten.

Im Teilchenbild kann das Fotoeffekt-Experiment mit Hilfe des Energie-Frequenz-Diagramms ausgewertet werden (s. Darstellung in der Abb. A.8).



Geradengleichung:

lineare Funktion: $y = mx + t$

Fotoeffekt: $eU = E_{\text{kin}} = hf + W_a$

Steigung ist materialunabhängig:

Plancksche Konstante: $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Js

Achsenabschnitt ist materialunabhängig:

Austrittsarbeit W_a

Abbildung A.8: Energie-Frequenz-Diagramm

A. Einstein beschrieb den Fotoeffekt im Teilchenmodell so:

“In die oberflächliche Schicht des Körpers dringen Energiequanten ein, und deren Energie verwandelt sich wenigstens zum Teil in kinetische Energie von Elektronen. Die einfachste Vorstellung ist die, daß ein Lichtquant seine ganze Energie an ein einziges Elektron abgibt... Außerdem wird anzunehmen sein, daß jedes Elektron beim Verlassen des Körpers eine für den Körper charakteristische Arbeit P zu leisten hat, wenn es den Körper verläßt... Mit den von Hm. Lenard beobachteten Eigenschaften der lichtelektrischen Wirkung [= Fotoeffekt] steht unsere Auffassung, soweit ich sehe, im Widerspruch. Wenn jedes Energiequant des erregenden Lichts unabhängig von allen übrigen seine Energie an Elektronen abgibt, so wird die Geschwindigkeit... der Elektronen... von der Intensität des erregenden Lichts unabhängig sein...” [A. Einstein 1905]

Große Physiker wie M. Planck waren der neuen Theorie gegenüber skeptisch:

“Es scheint mir, daß gegenüber der neuen Einteinschen Theorie des Lichts größte Vorsicht geboten ist... Die Theorie des Lichts würde nicht um Jahrzehnte, sondern um Jahrhunderte zurückgeworfen, bis in die Zeit, da Christian Huygens seinen Kampf gegen die übermächtige Newtonsche Emissionstheorie wagte... Und alle diese Errungenschaften, die zu den stolzsten der Physik, ja Naturwissenschaft überhaupt gehören, sollen preisgegeben werden um einiger noch recht anfechtbarer Betrachtungen willen? Da bedarf es denn doch noch schwereren Geschützes, um das nachgerade stark fundierte Gebäude der elektromagnetischen Lichttheorie ins Wanken zu bringen...” [M. Planck 1907]

Tatsächlich beschreibt das Teilchenmodell den Fotoeffekt nicht richtig, sobald über die Energie- und Impulsbilanzen hinaus Vorhersagen gemacht werden sollen, z.B. über die Winkelverteilung der herausgeschlagenen Elektronen: Elektronen werden nicht bevorzugt in Einfallrichtung der Photonen, sondern senkrecht dazu, in Richtung des elektrischen Feldvektors beschleunigt.

Vielleicht entzündet sich hier eine Diskussion darüber, wie sich das Licht nun tatsächlich verhält, wellenartig oder teilchenartig. Man kann die alte Scherfrage stellen, ob Licht am Montag, Mittwoch und Freitag Wellen, am Dienstag, Donnerstag und Samstag Teilchen spielen muß und am Sonntag frei hat. Möglicherweise kommt der Vorschlag auf, ob das Verhalten nicht vom Experiment abhängt [...].

4. Unterrichtsfeld: Rationale Rekonstruktion

2. Arbeitsblatt zum Themenbereich: Teilchen und Wellen

Teilchen und Wellen

Wenn man mit einem Freund aus einer entfernten Stadt sprechen will, kann man ihm zum Beispiel einen Brief schicken oder mit ihm telefonieren. Es sind also zwei Möglichkeiten vorhanden, durch die von einem entfernten Ort Nachrichten zu uns gelangen können.

Die erste Alternative (der Brief) soll hier eine Analogie zu Teilchen darstellen. D.h. ein materielles Objekt geht von einem Ort zum anderen und bringt die Information mit sich.

Die zweite Alternative (das Telefongespräch) sei hier eine Analogie zur Wellen. Mit einer Welle werden Informationen von einem Ort zum anderen übertragen, ohne die Übertragung eines materiellen Objektes.

Teilchen und Wellen sind zwei physikalische Bezugssysteme. Diese beiden Systeme sind nach Aussagen der klassischen Physik voneinander getrennt. Teilchen beschreiben lokalisierte Objekte, die die Energie transportieren. Wellen bedeuten dagegen eine Verteilung der Energie.

Wie verhalten sich Teilchen und Wellen am Beispiel unseres Mach-Zehnder-Interferometers?

Experimente mit dem Mach-Zehnder-Interferometer:**1. Interferometer mit keinen Bällen: Teilchenbild** (s. Abb. A.9)

1a) Bei diesem hypothetischen Experiment geht es darum festzustellen, wie viele Kugeln in Korb 1 und in Korb 2 in einem bestimmten Zeitraum gelangen, d.h. es soll die Wahrscheinlichkeit untersucht werden, mit der die Kugeln in den Korb 1 bzw. in den Korb 2 fallen. Nehmen wir an, dass in diesem Zeitraum 100 Kugeln von der Kugelquelle ausgesendet werden.

Für das Schema in der Abbildung A.9 gilt:

i) Rad 1 und Rad 2: Zahnrad

ii) Von der Kugelquelle werden einige Kugeln durch die Zahnücke des Zahnrads durchlaufen und einige Kugeln an den Zähnen des Zahnrads reflektiert (mit gleicher Wahrscheinlichkeit für die Reflexion und für die Transmission einer Kugel).

i) Die Kugel kommen immer stückweise im Korb an.

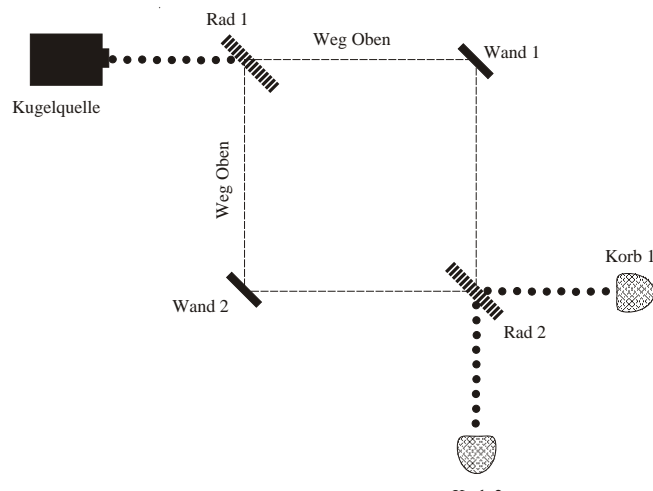


Abbildung A.9: Das Mach-Zehnder-Interferometer: Weginformation

Korb 1

Kugeln vom "Weg Oben" ohne Hindernis = Kugeln.

Kugeln vom "Weg Unten" ohne Hindernis = Kugeln.

Summe (Korb 1: Weg Oben + Weg Unten) = Kugeln.

Korb 2

Kugeln vom "Weg Oben" ohne Hindernis = Kugeln.

Kugeln vom "Weg Unten" ohne Hindernis = Kugeln.

Summe (Korb 2: Weg Oben + Weg Unten) = Kugeln.

1b) Was passiert Ihrer Meinung nach, wenn wir im Weg Unten zwischen Rad 1 und Wand 2 ein Hindernis aufbauen? Wie viele Kugeln werden jetzt im Korb 1 und im Korb 2 aufgefangen werden?

Korb 1 mit Hindernis = Kugeln.

Korb 2 mit Hindernis = Kugeln.

1c) Was passiert Ihrer Meinung nach, wenn wir im Weg Unten zwischen Rad 1 und Wand 1 ein Hindernis aufbauen? Wie viele Kugeln werden jetzt im Korb 1 und im Korb 2 aufgefangen werden?

Korb 1 mit Hindernis = Kugeln.

Korb 2 mit Hindernis = Kugeln.

2. Interferometer mit Licht: Wellenbild (s. Abb. A.10)

2a) Bei diesem Experiment geht es darum, die Intensität der einfallenden Licht im Detektor D1 und im Detektor D2 festzustellen.

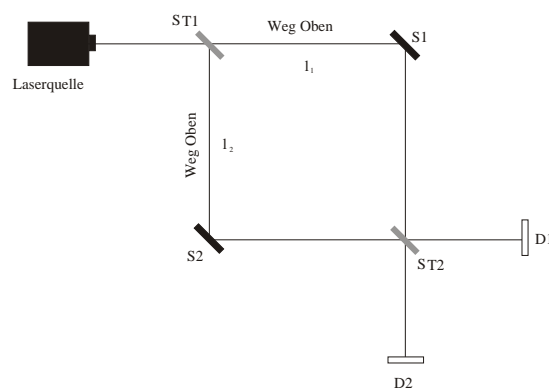


Abbildung A.10: Das Mach-Zehnder-Interferometer: Interferenzerscheinung

Für das Schema in der Abbildung gelten (so wie für das Arbeitsblatt 3.2) die Aussagen für das Licht nach dem Wellenmodell im idealisierten Mach-Zehnder-Interferometer.

i) Es gibt keine Phasendifferenz zwischen den Teilstrahlen vom Weg Oben und vom Weg Unten zu D1, so findet an D1 konstruktive Interferenz statt. Die beiden Teilstrahlen sind in Phase und die resultierende Intensität entspricht der Intensität des in die Apparatur einfallenden Strahls. D.h.: Intensität in D1 ohne Hindernis = Intensität in der Lichtquelle.

ii) Gibt es eine Phasendifferenz von $\lambda/2$ zwischen den Teilstrahlen vom Weg Oben und vom Weg Unten zu D2, was destruktive Interferenz an D2 bewirkt. Die resultierende Intensität beträgt an dieser Stelle Null! D.h.: Intensität in D2 ohne Hindernis = Null.

2b) Was passiert Ihrer Meinung nach, wenn wir im Weg Unten zwischen ST1 und S2 ein lichtundurchlässiges Hindernis aufbauen? Wieviel Prozent der einfallenden Lichtintensität trifft auf?

Detektor 1 mit Hindernis = % der einfallenden Intensität.

Detektor 2 mit Hindernis = % der einfallenden Intensität.

2c) Was passiert Ihrer Meinung nach, wenn wir im Weg Unten zwischen ST1 und S1 ein lichtundurchlässiges Hindernis aufbauen? Wieviel Prozent der einfallenden Lichtintensität trifft auf?

Detektor 1 mit Hindernis = % der einfallenden Intensität.

Detektor 2 mit Hindernis = % der einfallenden Intensität.

Bei Interferenz von Lichtwellen addieren sich *nicht* die Intensitäten!

4. Unterrichtsfeld: Rationale Rekonstruktion

4. Arbeitsblatt zum Themenbereich: Das MZ-Interferometer für Photonen

(Der Text zu diesem Abschnitt besteht aus adaptierten Textteilen aus “Physikalische Blätter, Heft12, Dez.00”)

Die Quantenphysik hat zu Beginn des letzten Jahrhunderts das auf der klassischen Physik basierende Weltbild grundlegend geändert. Sie widerspricht in vielen Bereichen unserer Intuition, und deshalb wurde in der Vergangenheit immer wieder ihre Vollständigkeit infrage gestellt und eine Ergänzung gefordert. Dies hat neben der Diskussion der philosophischen Grundsatzfragen auch zu vielen Gedankenexperimenten geführt; ferner wurden Paradoxe aufgezeigt und diskutiert.

Einstein äußerte schon 1909 sein Unbehagen darüber, dass in der Quantenphysik der Zufall eine große Rolle spielt. Die klassische Physik lässt uns vorhersagen, wie ein Ereignis abläuft, wenn wir alle Kräfte kennen. So lässt sich im Prinzip berechnen, ob das berühmte Butterbrot, das vom Tisch fällt, auf der Butter oder auf der Brotseite am Fußboden ankommt. Anders ist es in der Quantenphysik: Wir können nicht wissen, wann ein Atom aus einem angeregten Zustand in den Grundzustand übergeht, wir können nur Wahrscheinlichkeiten für diesen Vorgang angeben. Ebenso lässt sich nicht sagen, ob das nächste Photon, das auf eine Glasplatte trifft, reflektiert oder transmittiert wird.

Die verfeinerte Experimentiertechnik und das gewachsene Vertrauen in die Quantenmechanik führten dazu, Gedankenexperimente aus dieser Gründerzeit der Quantentheorie einer experimentellen und theoretischen Überprüfung zugänglich zu machen.

Das betrifft die große Anzahl von Interferenzexperimenten, die mit Quantenobjekten durchgeführt werden. Experimente mit Mach-Zehnder-Interferometern und Photonen wurden bereits konkret durchgeführt.

Wir werfen hier einen Blick auf einen experimentellen Test der Grundlagen der Quantenphysik: Im Jahre 1978 wurde ein Experiment vorgeschlagen, welches die Seltsamkeit der Quantenwelt eindrucksvoll zeigt. Dabei wurde eine experimentelle Anordnung benutzt, die dem Mach-Zehnder-Interferometer sehr ähnelt: Ein Photon trifft auf den ersten Strahlteiler. Zwei Fragen über das weitere “Schicksal” des Photons drängen sich auf:

- Schlägt das Photon einen bestimmten Weg ein, wird es also reflektiert und zeigt damit Teilchencharakter (d.h. Konzentration der Materie und Energie)?
- Oder wird das Photon sowohl durchgelassen als auch reflektiert, interferiert mit sich selbst und zeigt damit Wellencharakter (d.h. Verteilung der Energie)?

Neues Experiment im bekannten Aufbau: Das Mach-Zehnder-Interferometer mit Photonen

1) Wenn nacheinander viele getrennte Photonen in das Interferometer geschickt werden, was wird der Detektor D1 (s. Abb. A.11) registrieren? Was wird der Detektor 2 registrieren?

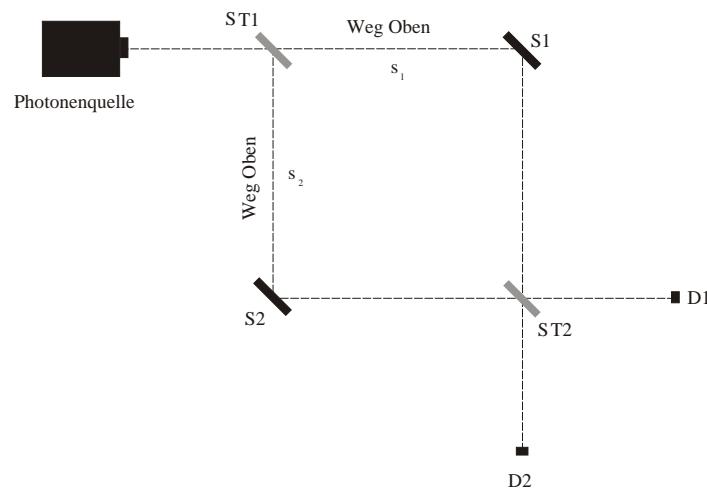


Abbildung A.11: *Das Mach-Zehnder-Interferometer für einzelne Photonen*

Detektor 1 =

Detektor 2 =

1a) Welche Wege kann das Photon, das bei D1 ankommt, genommen haben?

1b) Welche Wege kann das Photon, das bei D2 ankommt, genommen haben?

2) Wir bauen wieder zwischen dem Strahlteiler (ST1) und dem 2. Spiegel (S2) ein lichtundurchlässiges Hindernis ein (s. Abb. A.12).

2a) Was wird jetzt der Detektor D1 registrieren?

2b) Was wird jetzt der Detektor D2 registrieren?

3) Welche zusätzliche Information hat man jetzt allerdings über die Photonen, die in D1 ankommen, im Gegensatz zur Aufgabe 1.

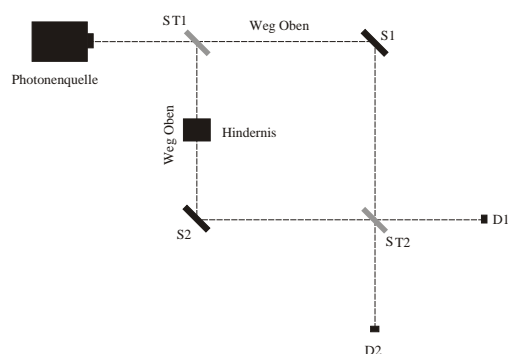


Abbildung A.12: Das Mach-Zehnder-Interferometer mit Hindernis

4) Photonendetektoren werden überall auf eine Fläche, die der Fläche eines großen Schirmes entspricht, verteilt. Was werden die Detektoren auf dem Schirm in der Position 1 und die Detektoren auf dem Schirm in der Position 2 registrieren, wenn nacheinander Photonen in das Interferometer geschickt werden? (Zeichnen Sie es auf den Kästchen in der Darstellungen in der Abb. A.13)

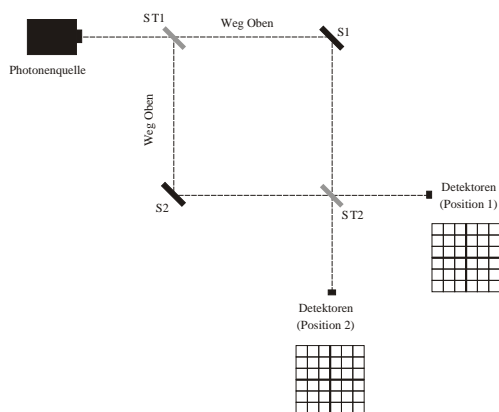


Abbildung A.13: Das Mach-Zehnder-Interferometer: Komplementäre Bilder

5) Als was können wir nun also diesen Begriff "Photon" ansehen?

4. Unterrichtsfeld: Rationale Rekonstruktion

**5. Arbeitsblatt zum Themenbereich:
Interferometer für Photonen – Interpretationen**

Interpretationen mit Wellencharakter: Das Photon wird als Wellenpaket dargestellt. Es breitet sich durch den Raum aus und wird an halbdurchlässigen Spiegeln geteilt, so dass Photonen miteinander interferieren können.

Kritische Aspekte:

Interpretationen mit Korpuskularcharakter: Das Photon wird nie geteilt. Es geht entweder entlang eines Weges oder entlang des anderen.

Kritische Aspekte:

Realistische Interpretationen mit dualistischem Charakter: Das Photon wird nie geteilt. Es geht entweder einen Weg oder den anderen. Mit ihm werden jedoch immer leere Wellen assoziiert und das Photon bewegt sich nur auf solchen Wellen. Die leeren Wellen können miteinander interferieren.

Kritische Aspekte:

Positivistische Interpretationen mit dualistischem Charakter: Das Photon lässt sich entweder als Welle oder als Teilchen darstellen. Sein Verhalten hängt von der experimentellen Anordnung ab.

Kritische Aspekte:

4. Unterrichtsfeld: Rationale Rekonstruktion

6. Arbeitsblatt zum Themenbereich: Quantenobjekten

Fassen wir zusammen:

1. Photonen im Mach-Zehnder-Interferometer

Jedes registrierte Photon überträgt seine ganze Energie auf eine einzige Stelle. Eine derartige lokalisierte Wechselwirkung ist typisch für das klassische Teilchen.

Jedes Photon wird nicht mit gleicher Wahrscheinlichkeit im Detektor D1 und im Detektor D2 registriert. Ein derartiges Verhalten ist nicht typisch für das klassische Teilchen (s. Arbeitsblatt 4.2, Aufgabe 1: Hypothetisches Interferometer mit Kugeln).

Ein Hindernis stört das Verhalten der Photonen im Interferometer, sodass die Detektoren D1 und D2 mit gleicher Wahrscheinlichkeit ein Photon registrieren können (s. Arbeitsblatt 4.4, Aufgabe 2). Daher ist immer, wenn ich sagen kann, "ich kenne den Weg eines Photons im Interferometer", damit auch automatisch die Interferenzerscheinung verschwunden.

Obwohl ein Quantenobjekt eine Eigenschaft (z.B. "Weg Oben") nicht besitzen muss, wird bei einer Messung dieser Eigenschaft immer ein bestimmter Wert gefunden (z.B. "Weg Oben" oder "Weg Unten")

Das Verhalten von Photonen kann in ähnlicher Form beschrieben werden, wie es mit dem elektromagnetischen Feld für die Ausbreitung von kontinuierlichem Licht im Interferometer erfolgt ist. Die Intensität des Lichts im Interferometer mit kontinuierlichem Licht (proportional zum Quadrat der elektrischen Feldstärke) ist proportional zur Wahrscheinlichkeit, Photonen an einem Ort zu registrieren.

2. Quantenphysik: Wellenfunktion

Es ist tatsächlich eine Welle im Spiel. Diese Welle hat jedoch keine unmittelbare physikalische Bedeutung, und sie lässt sich auch nicht messen, sondern sie stellt die Wahrscheinlichkeit dar, mit der Photonen die theoretisch vorhandenen Möglichkeiten wahrnimmt.

Die Welle, von der die Rede ist, wird als Wahrscheinlichkeitswelle oder ψ -Funktion bezeichnet (obwohl vielleicht der Ausdruck "Möglichkeitswelle" am besten charakterisiert, was gemeint ist).

Die ψ -Funktion (Möglichkeitswelle) hat also nicht den Status einer physikalischen Messgröße, sondern eher den einer mathematischen Hilfsgröße. Die ψ -Funktion beschreibt die Ausbreitung von Photonen oder die Wahrscheinlichkeit, Photonen in einem bestimmten Raumvolumen nachzuweisen.

3. Quantenobjekte

Das am Beispiel des Mach-Zehnder-Interferometers betrachtete Phänomen ist nur ein Spezialfall. In der Quantenphysik stößt man immer wieder auf ähnliche Situationen, wenn man Interferenzexperimente mit Quantenobjekten durchführt.

Ein Vergleich zwischen den grundlegenden Forderungen und Annahmen der Quantenphysik und denen der klassischen Physik macht die neue Interpretation des Begriffs Teilchen deutlich. In der klassischen Physik sind alle Teilchen exakt durch die Raum-Zeit-Bahn lückenlos vorherbestimmt. In der Quantenphysik gibt es keine Raum-Zeit-Bahnen, schon gar keine vorbestimmten!

Es ist nicht möglich, das physikalische Verhalten von Photonen in einem reinen Teilchen- oder Wellenmodell zu beschreiben. Eine befriedigende Erklärung muss Elemente beider Modelle in sich vereinigen.